

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Počítačová podpora optimalizace řezných podmínek při frézování tvarových ploch

Computer Aided Optimization of Cutting Conditions during Free Form Surface Milling

Student:

Bc. Radek Zatloukal

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Zatloukal**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: Počítačová podpora optimalizace řezných podmínek při frézování  
tvarových ploch  
Computer Aided Optimization of Cutting Conditions during Free Form  
Surface Milling

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Možnosti optimalizace řezných podmínek při programování CNC obráběcích strojů.
2. Teoretický rozbor optimalizace řezných podmínek.
3. Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

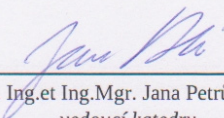
- [1] SADÍLEK, M.; SADÍLKOVÁ Z. *Počítačová podpora procesu obrábění*. VŠB – TU Ostrava, 2012, 149 s., Dostupné na: <http://vyuka.fs.vsb.cz/>. ISBN 978-80-248-2770-4.  
[2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
[3] MÁDL, J. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Praha: ČVUT Praha, 1988. 57 s.

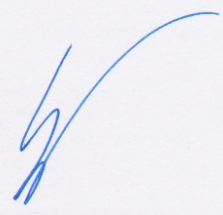
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

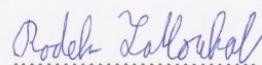
  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2017



Podpis studenta



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).  
beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce
- podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2017

*Radek Zatloukal*  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Radek Zatloukal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Polní 384, Kojetín, 752 01

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Zatloukal, R. *Počítačová podpora optimalizace řezných podmínek při frézování tvarových ploch: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 54 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Cílem diplomové práce je navržení softwaru pro optimalizaci řezných parametrů pro frézování tvarových ploch v plnohodnotném programovacím jazyku (byl zvolen VB.NET/C#). V úvodu práce je obecně popsána problematika optimalizace řezných parametrů, a dále jsou uvedeny jednotlivá kritéria optimálnosti. Následuje popis omezujících podmínek při obrábění. Uvedeny jsou i možné způsoby řešení optimalizace převážně pomocí výpočetní techniky. V praktické části je přiblížen současný stav programového řešení problematiky, návrh možných variant a popis výběru zvoleného řešení. Na závěr práce je ukázáno a popsáno prostředí vytvořeného optimalizačního softwaru.

## **ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS**

Zatloukal, R. *Computer aided optimization of cutting conditions during free form surface milling: diploma thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 54 p. Thesis head: Sadílek, M.

In this diploma thesis is created software for optimization of cutting parameters for milling in a full-fledged programming language (VB.NET/C#). At the beginning of the thesis, the issue of optimization of cutting parameters is described, as well as the individual criteria of optimality. Also is a described restrictive condition in cutting condition. There are also possible ways to optimize solutions using computer technology. The practical part describes the current state of the problem solving, proposal of possible solution variants and description of selected solution. At the end of the thesis is shown created optimization software and their function.

## Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů .....	8
1. Úvod - cíle práce.....	13
2. Optimalizace obráběcího procesu.....	14
3. Kritérium optimálnosti z hlediska výrobních nákladů.....	15
4. Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity.....	21
5. Kritérium optimálnosti z hlediska zisku .....	22
6. Vícekriteriální optimalizace .....	23
7. Omezení a jejich matematická formulace.....	24
7.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje .....	25
7.2 Omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem.....	26
7.3 Omezení dané maximálně přípustným silami.....	27
7.4 Omezení dané vhodným utvářením třísek.....	27
7.5 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy .....	29
7.6 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje .....	30
7.7 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje.....	30
7.8 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem.....	31
7.9 Organizační omezení .....	32
8. Oblast přípustných řešení .....	33
9. Vztah optimální trvanlivosti a omezujících podmínek .....	34
10. Optimální trvanlivost bez uvažování omezujících podmínek.....	36
10.1 Optimální trvanlivost z hlediska minimálních výrobních nákladů .....	36
10.2 Optimální trvanlivost z hlediska maximální produktivity nákladů .....	36
10.3 Optimální trvanlivost z hlediska maximálního zisku .....	37
10.4. Optimální trvanlivost s uvažováním omezujících podmínek.....	37
11. Komplexní optimalizace řezných podmínek .....	38
11.1 Lineární programování a lineární parametrické programování.....	39
11.2 Analytické metody .....	39
11.3 Gradientní metoda .....	40

11.4 Další metody .....	40
12. Adaptivní optimalizace.....	41
13. Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek.....	42
13.1 Možnosti variant podoby optimalizačního softwaru .....	42
13.2 Porovnání s existujícím řešením.....	43
13.3 Volba programovacího jazyka .....	43
13.4 Prostředí vytvořeného softwaru .....	45
14. Závěr.....	50
Poděkování.....	52
Použitá literatura.....	53

## Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Výklad	Jednotka
$C_E$	cena elektrické energie	[Kč/hod.]
$CFS_{EFPL}$	časový fond stroje	[hod./rok]
$C_S$	cena stroje	[Kč]
$C_d$	cena břitové destičky	[Kč]
$C_n$	cena nástroje	[Kč]
$C_{tn}$	cena tělesa nástroje	[Kč]
$C_{zn}$	zbytková cena nástroje	[Kč]
$D_n$	průměr nástroje	[mm]
$F_c$	řezná síla	[N]
$F_{pc\ max}$	maximálně přípustná velikost výslednice řezné a pasivní síly	[N]
$HRP_{OS}$	hodinový režijní paušál ostřírny	[Kč/hod.]
$HRP_{SP}$	hodinový režijní paušál společných nákladů (střediskový)	[Kč/hod.]
$M_{k\ max}$	maximálně přípustná velikost kroutícího momentu	[Nm]
$M_k$	kroutící moment na vřetenu	[Nm]
$M_o$	mzda operátora (dělníka) včetně soc. a zdravotního pojištění	[Kč/hod.]
$M_{os}$	mzda ostříče včetně sociálního a zdravotního pojištění	[Kč/hod.]
$M_s$	mzda seřizovače včetně sociálního a zdravotního pojištění	[Kč/hod.]
$N$	výrobní náklady na uvažovaný operační úsek	[Kč]
$N_h$	normohodiny	[hod.]
$N_{hs}$	hodinové náklady na provoz stroje	[Kč/hod.]
$N_n$	náklady na nástroje vztažené na operační úsek	[Kč]



$N_{nT}$	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu	[Kč]
$N_o$	kvalifikovaný odhad hodnoty N	[Kč]
$N_s$	náklady na strojní práci na operační úsek	[Kč]
$N_{sm}$	náklady na strojní práci	[Kč/min.]
$N_{vn}$	náklady na výměnu, resp. znovuseřízení opotřeбенého nástroje nebo výměnné břitové destičky vztažené na operační úsek	[Kč]
$N_{vnm}$	náklady na výměnu nástroje	[Kč/min.]
$O_s$	odpis stroje	[Kč/hod.]
$P_c$	řezný výkon	[W]
$P_e$	výkon elektromotoru stroje	[W]
$RNO_{PL}$	režijní náklady ostřírny plánované roční	[%]
$RNS_{PL}$	režijní náklady střediska plánované	[%]
$R_{a\ max}$	maximální přípustná aritmetická úchylka obrobené plochy	[μm]
$R_a$	aritmetická úchylka obrobené plochy	[μm]
$S_M$	směnnost	[-]
$T$	trvanlivost břitu nástroje	[min.]
$Z_s$	životnost stroje	[roky]
$c_v$	empirická konstanta	[-]
$f_{Ra\ max}$	maximální hodnota posuvu, která ještě vyhovuje uvažovaném rozsahu možných pracovních podmínek	[mm/ot.]
$f_m$	posuv	[mm/min.]
$f_{s\ max}$	maximální posuv dosažitelný na stroji	[mm/ot.]
$f_{s\ min}$	minimální posuv dosažitelný na stroji	[mm/ot.]
$f_{sm\ max}$	maximální posuv dosažitelný na stroji	[mm/min.]

$f_{sm\ min}$	minimální posuv dosažitelný na stroji	[mm/min.]
$f_{u\ max}$	maximální přípustná velikost posuvu z hlediska vhodného utváření třísky	[mm/ot.]
$f_{u\ min}$	minimální přípustná velikost posuvu z hlediska vhodného utváření třísky	[mm/ot.]
$f_z$	posuv na zub	[mm]
$k_{FC}$	empirická konstanta	[-]
$k_c$	přirážka směnového času	[-]
$k_r$	poměr skutečného času, resp. délky obrábění a strojního času, resp. délky automatického chodu nástroje	[-]
$k_{us}$	koeficient oprav a údržby stroje	[-]
$k_{ut}$	koeficient údržby tělesa nástroje	[-]
$k_{vs}$	koeficient časového využití stroje	[-]
$k_{yz}$	konstanta vlivu řezné síly	[-]
$k_\theta$	empirická konstanta	[-]
m	empirická konstanta	[-]
n	otáčky za minutu	[-]
$n_{s\ max}$	maximální otáčky dosažitelné na stroji	[ot/min.]
$n_{s\ min}$	minimální otáčky dosažitelné na stroji	[ot/min.]
$q_v$	empirická konstanta	[-]
r	váhový koeficient	[-]
$r_\varepsilon$	poměr špičky nástroje	[mm]
$s_b$	součinitel využití břitových destiček	[-]

$t_{As}$	strojní čas	[min.]
$t_{os}$	čas ostření nástroje	[min.]
$t_u$	čas operačního úseku	[min.]
$t_{uo}$	odhad hodnoty $t_u$	[min]
$t_{vn}$	čas na výměnu nástroje	[min.]
$u_{Fc}$	empirická konstanta	[-]
$u_v$	empirická konstanta	[-]
$v_c$	řezná rychlost	[m/min.]
$w_{Fc}$	empirická konstanta	[-]
$w_v$	empirická konstanta	[-]
$x_{Fc}$	empirická konstanta	[-]
$x_v$	empirická konstanta	[-]
$x_\theta$	empirická konstanta	[-]
$y_{Fc}$	empirická konstanta	[-]
$y_v$	empirická konstanta	[-]
$y_\theta$	empirická konstanta	[-]
$z$	počet zubů nástroje	[-]
$z_0$	počet možných přestřehů destičky	[-]
$z_{Fc}$	empirická konstanta	[-]
$z_b$	počet břitů na destičce	[-]
$z_d$	počet břitových destiček na nástroji	[-]
$z_o$	počet možných přestřehů nástroje	[-]

$z_u$	předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje	[-]
$z_v$	počet výměn nástroje, vztažený na jeden operační úsek	[-]
$z_\theta$	empirická konstanta	[-]
$\kappa_r$	úhel nastavení	[°]
$\kappa_r'$	vedlejší úhel nastavení	[°]
$\eta$	mechanická účinnost stroje	[-]
$\theta$	teplota řezání	[°]

## 1. Úvod - cíle práce

Tato diplomová práce se zabývá problematikou optimalizace třískového obráběcího procesu.

Cíle práce a možnosti využití:

- a) Hlavním cílem je vytvoření optimalizačního softwaru pro frézování tvarových ploch v plnohodnotném programovacím jazyku, který by bylo možné použít jako stěžejní část na míru upravených optimalizačních softwarů pro konkrétní podniky. Upravených z důvodů individuálního přístupu k vyčíslování jednotlivých nákladů (tvořící vstup do daného softwaru) v jednotlivých podnicích, a dále nutnosti relativně složitého a nákladného zjišťování empirických koeficientů, nutných pro výpočet, jejíž zjištění by bylo prováděno spolu s úpravou softwaru.
- b) Dále by se dalo uvažovat o zařazení takového programu jako výukový materiál, neboť na jednotlivých grafech znázorňující závislosti a omezující podmínky při optimalizovaném procesu obrábění, lze snadno demonstrovat vliv změny jednotlivých parametrů frézování, které je možné měnit a současně okamžitě sledovat výslednou změnu jednotlivých nákladů, časů a možných oblastí přípustných řešení.
- c) Dále by bylo možné využít vytvořený software a jeho algoritmy pro další rozpracování, ve kterých by byly zahrnuty další technologie obrábění, omezující podmínky či více nástrojové obrábění v jednom okamžiku, a získat tak univerzální optimalizační software, jehož jednorázová tvorba by jinak byla časově a finančně velmi náročná.
- d) V neposlední řadě by se také dalo uvažovat o využití vytvořených algoritmů programu jako určitý základ pro automatickou volbu řezných podmínek v továrnách nové generace (tzv. Průmysl 4.0), obsahující vysoce automatizované obráběcí stroje s minimem zásahů lidského faktoru během výroby.

## 2. Optimalizace obráběcího procesu

Díky velké konkurenci mezi strojírenskými podniky na celosvětovém trhu roste snaha minimalizovat výrobní náklady. Ty u strojírenských výrobků obvykle tvoří asi 40% jejich ceny. Z toho je patrné, že jakákoliv ne hospodárnost během výroby je promítnuta o koncové ceny a tím i do zisku podniku. [1, 2]

Volba optimálních pracovních podmínek je jedním ze základních kroků při minimalizaci výrobních nákladů. Pojem optimální pracovní podmínky zahrnuje veškeré faktory vstupující do obráběcího procesu jako např. volba řezného nástroje a jeho geometrie, řezné prostředí, doba obrábění břitem nástroje, řezné podmínky apod. Často dochází k přehlížení optimalizace obráběcího procesu s odůvodněním, že existují významnější zdroje úspor. Je ovšem nutné si uvědomit, že s rostoucí cenou moderních obráběcích strojů rostou i náklady na strojní práci a nevhodná volba řezných podmínek může zásadně ovlivňovat náklady na výrobu a čas samotné výroby. [1, 2, 3]

Řezné podmínky jsou v praxi často voleny dle doporučených hodnot výrobce s následnou mírnou korekcí dle skutečného stavu obrábění. Takto volené řezné podmínky však vedou k nemalým rezervám z hlediska výrobních nákladů, jenž spolu s nevyužíváním potenciálu stroje a nástroje vedou k velkým finančním ztrátám, které si často podniky ani neuvědomují. Jako příklad z praxe lze uvést výrobu forem a zápustek, kde po určení optimální řezných parametrů došlo k snížení výrobní ceny jednoho kusu o více než pětinašobek a to při čtyřnásobném snížení výrobního času oproti výsledkům dosažených při použití výrobcem doporučených hodnot. [2, 3, 4]

Pro určení optimalizovaných řezných podmínek se využívá několik kritérií, jejíž volba závisí na požadovaných výsledných parametrech obráběcího procesu, a jsou uvedeny v následujících kapitolách.

### 3. Kritérium optimálnosti z hlediska výrobních nákladů [1, 2, 3, 4, 5]

Obrábění součástí lze obecně provádět buď jedním, nebo současně více nástroji. Jedno-nástrojové obrábění patří mezi jednodušší a zároveň nejčastější případ, proto se dále budeme věnovat pouze tomuto způsobu.

V praxi se v současné době provádí stanovení řezných podmínek pomocí buďto normativů, nebo dle doporučení výrobce nástrojů. Jedná se ovšem o zobecněné doporučené hodnoty, které nemusí – a většinou nejsou – ideální pro daný obráběcí proces.

Proto se provádí optimalizace řezných podmínek, která stanoví optimální hodnoty hloubky řezu, posuvu, řezné rychlosti a trvanlivosti nástroje dle určitého zvoleného optimalizačního kritéria v rámci určitých omezujících podmínek.

Nejčastěji se volí kritérium minimálních výrobních nákladů (výrobní náklady na operační úsek mají být minimální), kde platí:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = \min [1] \quad (3.1)$$

kde:  $N$  – výrobní náklady na uvažovaný operační úsek v Kč,

$N_s$  – náklady na strojní práci na operační úsek v Kč,

$N_n$  – náklady na nástroje vztažené na operační úsek v Kč,

$N_{vn}$  – náklady na výměnu, resp. znovuseřízení opotřeбенého nástroje nebo výměnné břitové destičky vztažené na operační úsek v Kč.

Při dalším upřesňování těchto vzorců lze použít dva způsoby vyjádření hodnoty režijních nákladů, v závislosti na zvyklostech v daném podniku:



a) Vyjádření výrobních režijních nákladů jako přírážka k přímým mzdám, kde platí:

$$N_s = t_{As} \left[ k_c \frac{M_o}{60} \left( 1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} * N_{sm} [1] \quad (3.2)$$

kde:  $t_{As}$  – strojní čas v min,

$k_c$  – přírážka směnového času (obvykle 1,11 až 1,15),

$M_o$  – mzda operátora (dělníka) včetně sociálního a zdravotního pojištění v Kč/hod.,

$RNS_{PL}$  – režijní náklady střediska plánované v %,

$N_{hs}$  – hodinové náklady na provoz stroje v Kč/hod.,

$N_{sm}$  – náklady na strojní práci v Kč/min.

V případě více strojové obsluhy je možné uvažovat poměrné rozdělení mzdy operátora na jednotlivé současně obsluhované stroje.

b) Vyjádření výrobních režijních nákladů pomocí hodinového režijního paušálu, kde platí:

$$N_s = t_{As} \left[ k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} * N_{sm} [1] \quad (3.3)$$

kde:  $HRP_{SP}$  – je hodinový režijní paušál společných nákladů (střediskový) v Kč/hod., Kč/Nh.

Pro hodinové náklady na provoz stroje platí:

$$N_{hs} = O_s * k_{us} + C_E [1] \quad (3.4)$$

kde:  $O_s$  – je odpis stroje v Kč/hod.,

$k_{us}$  – koeficient oprav a údržby stroje

$C_E$  – cena elektrické energie (obvykle se určuje jako střední hodnota průměru za určité předchozí období nebo kvalifikovaným odhadem) v Kč/hod.

Koeficient oprav a údržby stroje je dán jako podíl součtu ceny stroje, předpokládané částky na opravy resp. údržbu stroje za dobu jeho životnosti a ceny stroje.

Pro odpis stroje platí:

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s * CFS_{EFPL} * SM * k_{vs}} [1] \quad (3.5)$$

kde:  $C_s$  – cena stroje v Kč,

$Z_s$  – životnost stroje v rocích,

$CFS_{EFPL}$  – časový fond stroje v hod./rok a směnu,

SM – směnnost,

$k_{vs}$  – koeficient časového využití stroje.

Koeficient časového využití stroje neboli podíl času, kdy se na stroji pracuje v daném počtu směn k celkovému času uvažovaných směn, se stanovuje buď z dlouhodobého průměru, nebo z předpokladu o vytížení stroje. Orientačně jsou přibližné hodnoty tohoto koeficientu vyjádřeny v tabulce č. 1.

Druh výroby	$k_{vs}$
Hromadná a velkosériová výroba	0,8
Programově řízené stroje, obráběcí centra	0,65 – 0,75
Konvenční malosériová výroba	0,50 – 0,65

Tab. 1 - Koeficient časového využití stroje pro různé druhy výroby. [1]

Pro náklady na nástroje (jejich údržba, odpis, event. ostření) platí:

$$N_n = z_v * N_{nT} [1] \quad (3.6)$$

kde:  $z_v$  – počet výměn nástroje, vztažený na jeden operační úsek (většinou je roven číslu menší než 1),

$N_{nT}$  – náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty v Kč.

Počet výměn nástroje lze dále vyjádřit:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} * k_r [1] \quad (3.7)$$

kde:  $T$  – je trvanlivost bříty nástroje v min.,

$k_r$  – poměr skutečného času, resp. délky obrábění a strojního času, resp. délky automatického chodu nástroje.

Náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břítu závisí na druhu nástroje:

**a) Pro celistvé (přeastřované) nástroje platí:**

$$N_{nT} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} * k_c * \frac{M_{os}}{60} \left(1 + \frac{RNO_{PL}}{100}\right) \frac{z_o}{z_o + 1} [1] \quad (3.8)$$

kde:  $C_n$  – je cena nástroje v Kč,

$C_{zn}$  – zbytková cena nástroje v Kč,

$z_o$  – počet možných přeastření nástroje,

$t_{os}$  – čas ostření nástroje v min.,

$M_{os}$  – mzda ostříče včetně sociálního a zdravotního pojištění v Kč/hod,

$RNO_{PL}$  – režijní náklady ostřírny plánované roční v %.

Pro případ určení režie ostřírny pomocí hodinového režijního paušálu společných nákladů lze vyjádřit:

$$N_{nT} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} * k_c \left( \frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{OS}}{100} \right) \frac{z_o}{z_o + 1} [1] \quad (3.9)$$

kde:  $HRP_{OS}$  – je hodinový režijní paušál ostřírny v Kč/hod, Kč/Nh.

**b) Pro nástroj s výměnnými břitovými destičkami, které se nepřeastřují, platí:**

$$N_{nT} = \frac{C_d z_d}{z_b s_b} + (1 + k_{ut}) \frac{C_{tn}}{z_u} [1] \quad (3.10)$$

kde:  $C_d$  – je cena břitové destičky v Kč,

$z_d$  – počet břitových destiček na nástroji,

$z_b$  – počet břitů na destičce,

$s_b$  – součinitel využití břitových destiček,

$k_{ut}$  – koeficient údržby tělesa nástroje,

$C_{tn}$  – cena tělesa nástroje v Kč,

$z_u$  – předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje.

Přibližné hodnoty těchto empirických konstant byly zjištěny statisticky, a jsou uvedeny v tabulce č. 2. V praxi se ovšem mohou lišit v závislosti na konkrétních podmínkách obrábění v konkrétním podniku.

Podmínky obrábění	$z_u$	$s_b$	$k_{ut}$
Lehké	400 – 600	0,95	0,05
Střední	200 – 400	0,90	0,025
Těžké	200	0,80	0,40
Velmi těžké	100	0,70	0,60

Tab. 2 – Přibližné hodnoty empirických konstant pro dané podmínky obrábění. [1]

c) Pro nástroj s výměnnými břitovými destičkami, které se přeastřují, platí:

$$N_{nT} = \frac{C_d z_d z_0}{z_b s_b (z_0 + 1)} + (1 + k_{ut}) \frac{C_{tn}}{z_u} + t_{os} * k_c * \frac{M_{os}}{60} \left(1 + \frac{RNO_{PL}}{100}\right) \frac{z_0}{z_{o+1}} [1] \quad (3.11)$$

kde:  $z_0$  – je počet možných přeastření destičky.

V případě výpočtu dle hodinového režijního paušálu lze náklady na provoz nástroje vztahované na jednu trvanlivost břitu vyjádřit jako:

$$N_{nT} = \frac{C_d z_d z_0}{z_b s_b (z_0 + 1)} + (1 + k_{ut}) \frac{C_{tn}}{z_u} + t_{os} * k_c \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{OS}}{100}\right) \frac{z_0}{z_{o+1}} [1] \quad (3.12)$$

Pro náklady na výměnu nástroje platí:

$$N_{vn} = t_{vn} \left[ k_c * \frac{M_s}{60} \left(1 + \frac{RNS_{PL}}{100}\right) + \frac{O_s}{60} \right] = t_{vn} * N_{vnm} * z_v [1] \quad (3.13)$$

nebo v případě výpočtu dle hodinového režijního paušálu:

$$N_{vn} = t_{vn} \left[ k_c \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{100}\right) + \frac{O_s}{60} \right] = t_{vn} * N_{vnm} * z_v [1] \quad (3.14)$$

kde:  $t_{vn}$  – je čas na výměnu nástroje v min,

$M_s$  – mzda seřizovače včetně sociálního a zdravotního pojištění v Kč/hod.,

$N_{vnm}$  – náklady na výměnu nástroje v Kč/min.

Po dosazení těchto vztahů do kritéria (3.1) získáme kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů ve tvaru:

$$N = t_{As} N_{sm} + \frac{t_{As}}{T} k_r N_{nT} + t_{vn} * N_{vnm} * \frac{t_{As}}{T} k_r = \min [1] \quad (3.15)$$

po úpravě:

$$N = t_{As} N_{sm} + \frac{t_{As}}{T} k_r (N_{nT} + t_{vn} * N_{vnm}) = \min [1] \quad (3.16)$$

$$\text{kde: } t_{As} = \frac{L}{n * f_z} [1] \quad (3.17)$$

$L$  – je délka dráhy automatického chodu nástroje v mm,

$n$  – otáčky za minutu,

$f_z$  – posuv na zub v mm

po dosazení (3.17) do (3.16) získáme:

$$N = \frac{L}{n * f_z} N_{sm} + \frac{L * k_r}{n * f_z * T} (N_{nT} + t_{vn} * N_{vnm}) = \min [1] \quad (3.18)$$

a sloučením konstant můžeme vztah upravit jako:

$$\frac{K_1}{n * f_z} + \frac{K_2}{n * f_z * T} = \min [1] \quad (3.19)$$

$$\text{kde: } K_1 = L * N_{sm} \quad (3.20)$$

$$K_2 = L * k_r (N_{nT} + t_{vn} * N_{vnm}) \quad (3.21)$$

#### 4. Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity [1, 2, 3, 4, 5]

Další možný kritériem při optimalizaci řezných podmínek je kritérium maximální produktivity (výrobnosti). Při něm je cílem vyrobit maximální možný počet kusů za určitý čas bez ohledu na výrobní náklady. V praxi se používá spíše výjimečně, např. pokud je nutné splnit určitý termín dodání a hrozí finanční postih při nedodržení, i když na druhou stranu tuto situaci lze také řešit prací přesčas či výrobě v kooperaci. Toto kritérium bylo u nás často preferováno v minulosti.

Lze uvažovat také o kombinaci kritéria maximální produktivity s kritériem minimálních výrobních nákladů tak, aby náklady na obrábění byly minimální a současně byl dodržen termín vyhotovení výrobků. [1, 2]

Pro kritérium maximální produktivity platí:

$$t_u = t_{As} + t_{vn}z_v [1] \quad (4.1)$$

kde:  $t_u$  – je čas operačního úseku v min.

Dosazením za  $z_v$  a  $t_{As}$  ze vztahů (3.7) a (3.17) po úpravě dostaneme:

$$t_u = \frac{L}{n \cdot f_z} + \frac{L \cdot k_r \cdot t_{vn}}{n \cdot f_z \cdot T} = \min [1] \quad (4.2)$$

Sloučením konstant můžeme vztah upravit na:

$$t_u = \frac{K_3}{n \cdot f_z} + \frac{K_4}{n \cdot f_z \cdot T} = \min [1] \quad (4.3)$$

$$\text{kde: } K_3 = L \quad (4.4)$$

$$K_4 = L \cdot k_r \cdot t_{vn} \quad (4.5)$$

Z matematického hlediska je kritérium maximální produktivity a kritérium minimálních výrobních nákladů stejné, a proto lze snadno řešit optimalizaci oběma kritérii pouze dosazováním jiných hodnot číselných obou zlomků.

## **5. Kritérium optimálnosti z hlediska zisku [1]**

Kritérium maximálního zisku je z hlediska optimalizace analogické s kritériem minimální výrobních nákladů a vede ke stejným výsledkům.



## 6. Vícekriteriální optimalizace [1, 4]

V případě potřeby kompromisu mezi minimálními výrobními náklady a maximální produktivitou lze použít vícekriteriální optimalizaci, kde obě kritéria mají určitou předem určenou váhu.

Obecně platí:

$$VK = r \frac{N}{N_o} + (1 - r) \frac{t_u}{t_{uo}} = \min [1] \quad (6.1)$$

kde:  $r$  – je váhový koeficient,

$N_o$  – kvalifikovaný odhad hodnoty  $N$ , resp. hodnota  $N$  stanovená pomocí kritéria minimálních výrobních nákladů,

$t_{uo}$  – odhad hodnoty  $t_u$ , resp. hodnota  $t_u$  stanovená pomocí kritéria maximální produktivity.

Dosazením za  $N$  a  $t_u$  z kritérií (3.19) a (4.3) po úpravě dostaneme:

$$\frac{1}{n \cdot f_z} \left[ K_1 \frac{r}{N_o} + \frac{K_3(1-r)}{t_{uo}} \right] + \frac{1}{n \cdot f_z \cdot T} \left[ K_2 \frac{r}{N_o} + \frac{K_4(1-r)}{t_{uo}} \right] = \min [1] \quad (6.2)$$

## 7. Omezení a jejich matematická formulace [1, 2, 3, 4, 6]

Při optimalizaci řezných podmínek můžeme uvažovat optimalizace buď podle předchozích optimalizačních kritérií, nebo v rámci omezujících podmínek daných výrobními podmínkami, nebo komplexně. V této kapitole budou naznačeny omezení dané výrobními podmínkami, mezi které patří omezení dané obráběcím strojem (jeho výkonem, mezním kroutícím momentem upínacího prostředku, rozsahem otáček a posuvů apod.), nástrojem (dle jeho materiálu, geometrie, drsnosti povrchu břitu apod.), materiálem obrobku, řezným prostředím a požadovanými kvalitativními parametry. Se vzrůstajícím počtem omezujících podmínek stoupá složitost optimalizace a požadovaný výpočetní výkon při řešení pomocí výpočetní techniky. Je možné optimalizaci řešit pomocí lineárního programování, resp. lineárního parametrického programování kde dochází k linearizace omezujících podmínek. S rozvojem obráběcích strojů v poslední době došlo ke vzniku nelinearizovatelných omezujících podmínek, které optimalizace dále zkomplikovali. Jde např. o spojitě, nelinearizovatelné omezující podmínky z hlediska kroutícího momentu (protočení součásti ve sklíčidle) a ohybového momentu (vytržení součásti ze sklíčidla). Nejčastěji se tyto problémy vyskytují u obráběcích strojů pro HSC technologie. [1,2,3]

Dalším problémem je výskyt nespojitých omezujících podmínek, kde jde nejčastěji o různé výkonové charakteristiky obráběcích strojů. V takových případech pak optimalizace vede na intervalové optimalizační úlohy.

Již zmíněné podmínky je možné matematicky vyjádřit jako nerovnice, s výjimkou komplexního Taylorova vztahu, jenž je rovnicí.

Při formulaci omezujících podmínek při optimalizaci se obvykle postupuje tak, že se na levé straně vztahu vyjádří omezující veličina jako funkce řezných podmínek, a na pravé straně se uvede mezní velikost této veličiny. Dále se provedou úpravy vedoucí k ponechání proměnných na levé straně a převedení zbytku vztahu na pravou stranu. Někdy se na pravé straně také nechává proměnná trvanlivosti  $T$  a to z výpočetních důvodů.

Dále budou uvedeny formulace některých omezujících podmínek. Vzhledem k velkému rozsahu těchto podmínek a tomu, že v praxi je někdy těžké zjistit všechny potřebné údaje pro jejich stanovení, jich bude uvedeno jen několik nejčastějších.

## 7.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje [1, 4]

Jedná se o nejdůležitější omezení při hrubování. Výrobci obráběcích strojů nejčastěji popisují charakteristiky výkonu stroje jako závislosti výkonu nebo krouticího momentu na otáčkách vřetena.

Při uvažování konstantního výkonu obráběcího stroje platí podmínka:

$$P_c \leq P_e * \eta \quad [1] \quad (7.1)$$

kde:  $P_c$  – je řezný výkon ve W,

$P_e$  – výkon elektromotoru stroje ve W,

$\eta$  – mechanická účinnost stroje

Dále řezný výkon je funkcí řezné síly  $F_c$  a lze psát:

$$60 * P_c = F_c * v_c \quad [1] \quad (7.2)$$

kde:  $F_c$  – je řezná síla v N.

Řezná síla je funkcí řezných podmínek a pro frézování ji lze vyjádřit v empirickém tvaru:

$$F_c = k_{Fc} * a_p^{x_{Fc}} * f_z^{y_{Fc}} * v_c^{z_{Fc}} * B^{u_{Fc}} * Z * D_n^{w_{Fc}} \quad [1] \quad (7.3)$$

kde:  $k_{Fc}$  – empirická konstanta

$x_{Fc}$  – empirická konstanta

$y_{Fc}$  – empirická konstanta

$z_{Fc}$  – empirická konstanta

B – šířka frézované plochy v mm

$u_{Fc}$  – empirická konstanta

Z – počet zubů nástroje

$D_n$  – průměr nástroje v mm

$w_{Fc}$  – empirická konstanta

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{10^3} - \text{řezná rychlost} \quad (7.4)$$

Vzhledem k tomu, že závislost řezné síly na řezné rychlosti je relativně malá -  $z_{Fc}$  se blíží nule, obecně nemonotonní, a pro určitý řezný materiál přidá v úvahu omezený rozsah řezné rychlosti, a dále také s přihlédnutím k tomu, že konstanta  $k_{Fc}$  se uvažuje s určitou bezpečností (vzhledem k rozptylu vlastností obráběného materiálu) můžeme po dosazení řezné rychlosti do vztahu 7.3 zanedbat vliv empirické konstanty.

Tedy dosazením rovnic (7.3) a (7.2) do vztahu (7.1) získáme omezující podmínku z hlediska konstantního výkonu po úpravě ve tvaru:

$$a_p^{x_{Fc}} * f_z^{y_{Fc}} * n \leq \frac{10^3 * 60 * P_e * \eta}{k_{Fc} * \pi * B^{u_{Fc}} * Z * D_n^{w_{Fc}+1}} [1] \quad (7.5)$$

## 7.2 Omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem [1, 4]

Z hlediska upnutí obrobku resp. síly upnutí je nutné uvažovat omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem:

$$M_k \leq M_{k \max} [1] \quad (7.6)$$

kde:  $M_k$  – je kroutící moment na vřetenu v Nm,

$M_{k \max}$  – maximálně přípustná velikost kroutícího momentu v Nm.

Pro konstantní kroutící moment (u sklíčidel při nízkých otáčkách) platí:

$$a_p^{x_{Fc}} * f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{2 * 10^3 * M_{k \max}}{k_{Fc} * B^{u_{Fc}} * Z * D_n^{w_{Fc}+1}} [1] \quad (7.7)$$

### 7.3 Omezení dané maximálně přípustným silami [1, 4]

Uvažuje se omezení z hlediska pevnosti nástroje (upínacího trnu). Pak je vhodné uvažovat výslednici  $F_{yz}$  tangenciální  $F_z$  a radiální  $F_y$  složky řezné síly, kde radiální sílu určíme dle:

$$F_y = k_{yz} * F_z \quad [4] \quad (7.8)$$

kde:  $k_{yz}$  – konstanta vlivu řezné síly, lze určit z odborné literatury

Omezující podmínka má pak tvar:

$$a_p^{x_{Fc}} * f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{pc \max}}{\sqrt{1 + k_{pc}^2 * k_{Fc} * B^{u_{Fc}} * Z * D_n^{w_{Fc}}}} \quad [4] \quad (7.9)$$

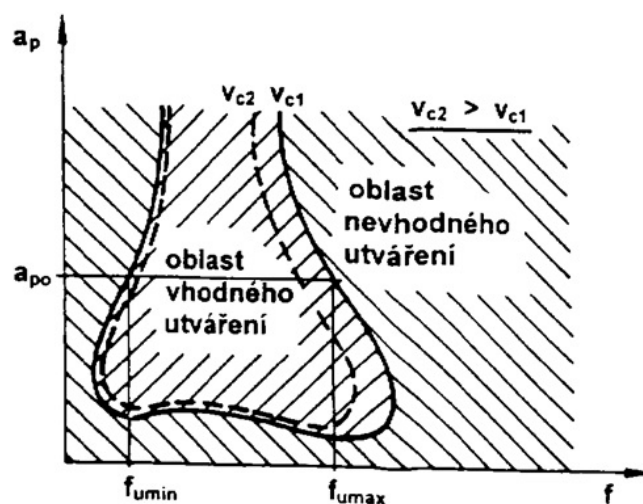
kde:  $F_{pc \max}$  – je maximálně přípustná velikost výslednice řezné a pasivní síly v N.

### 7.4 Omezení dané vhodným utvářením třísek [1, 4]

V případě technologických operací, kde samotný průběh procesu, případně samotný materiál obrobku nezajišťuje dělení třísek, je nutné, zvláště u strojů bez přímého dohledu obsluhy jako jsou obráběcí stroje, zajistit průběh obrábění v takovém rozsahu řezných podmínek, kdy dochází ke vhodnému utváření a dělení třísek vhodnou geometrií nástroje. Dlouhé či nevhodně utvářené třísky mohou narušit proces obrábění, zhoršit kvalitu povrchu či poškodit samotný nástroj či stroj.

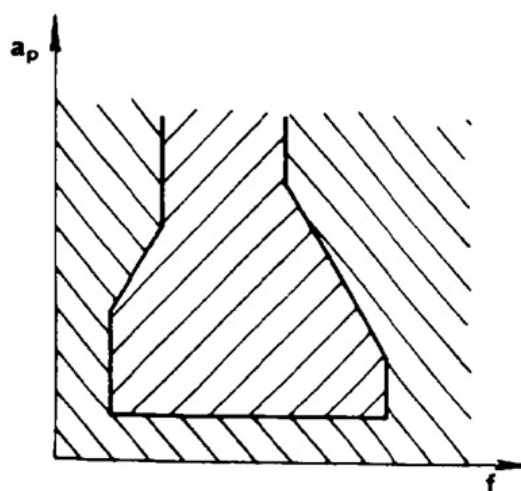
Je nutné zajistit, aby se třísky nevhodným utvářením nedostávaly zpět pod břit a nedošlo tak k jeho poškození. Dále je nutné, aby třísky nezahltily pracovní prostor stroje a neznemožnili tak další obrábění či výměnu nástroje.

Tyto podmínky se zajišťují experimentálním zjištěním oblasti vhodné pro utváření třísek pro daný nástroj a materiál, resp. druh obráběného materiálu. Typický tvar takové oblasti je zobrazen na obrázku č. 1.



Obr. 1 Oblast vhodného utváření třísek. [1]

Oblast vhodného utváření třísek je obvykle udáván v souřadnicích hloubka řezu – posuv, vždy pro určitý rozsah řezné rychlosti a danou kombinaci nástroje a materiálu. Obvykle se tato oblast určuje z katalogů výrobců nástrojů nebo experimentálně. Při softwarové optimalizace lze danou oblast zjednodušit tak, že daná oblast je matematicky popsána systémem úseček, jak ukazuje obrázek č.2.



Obr. 2 Nahrazení reálné hranice vhodného utváření třísek systémem úseček [1]

Vzhledem k tomu, že optimalizaci řezných podmínek je vhodné realizovat pro předem určenou hloubku řezu, je tak možné omezující podmínky uvažovat následovně:

$$f \leq f_{u\max} [1] \quad (7.10)$$

$$f \geq f_{u\min} [1] \quad (7.11)$$

kde:  $f_{u\max}$  – je maximální přípustná velikost posuvu z hlediska vhodného utváření třísky v mm/ot,

$f_{u\min}$  – minimální přípustná velikost posuvu z hlediska vhodného utváření třísky v mm/ot

## 7.5 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy [1, 4, 6, 7, 8]

Hlavně při obrábění na čisto je důležité omezení z hlediska drsnosti obrobené plochy, kde platí:

$$R_a \leq R_{a\max} [1] \quad (7.12)$$

kde:  $R_a$  – je aritmetická úchylka obrobené plochy v  $\mu\text{m}$ ,

$R_{a\max}$  – maximální přípustná aritmetická úchylka obrobené plochy v  $\mu\text{m}$ .

Obecně platí:

$$R_a = g(f, v_c, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa_r', \dots) [1] \quad (7.13)$$

kde:  $r_\varepsilon$  – je poměr špičky nástroje v mm

$\kappa_r$  – úhel nastavení ve stupních,

$\kappa_r'$  – vedlejší úhel nastavení ve stupních.



V odborné literatuře je uvedena řada empirických i teoreticky odvozených vztahů pro funkci drsnosti povrchu, ovšem většinou jde o vztahy s omezenou platností na konkrétní případ obrábění. Proto se často používá zjednodušený vztah:

$$f \leq f_{Ra\ max} [1] \quad (7.14)$$

kde:  $f_{Ra\ max}$  – je maximální hodnota posuvu, která ještě vyhovuje v uvažovaném rozsahu možných pracovních podmínek v mm/ot.

V praxi lze pak vycházet z konkrétních podmínek, při kterých obrábění probíhá a k němu doplnit omezení dle příslušných experimentálních (případně simulovaných) výsledků. Např. při obrábění nakloněnou kulovou frézou při náklonu  $5^\circ$  a více dochází k razantnímu snížení drsnosti vzniklého povrchu. Lze pak aplikovat tyto experimentálně získané výsledky do vytvoření omezující podmínky, upravené na míru konkrétnímu procesu obrábění a začlenit ji do procesu optimalizace.

## 7.6 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje [1, 4]

Podmínka omezení z hlediska maximální a minimálních otáček stroje vychází z toho, že každý stroj má omezený rozsah otáček, které na něm lze nastavit. Podmínky jsou tedy:

$$n \leq n_{s\ max} [1] \quad (7.15)$$

kde:  $n_{s\ max}$  – jsou maximální otáčky dosažitelné na stroji za minutu,

$$n \geq n_{s\ min} [1] \quad (7.16)$$

kde:  $n_{s\ min}$  – jsou minimální otáčky dosažitelné na stroji za minutu.

## 7.7 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje [1, 4]

Obdobně jako v předchozím omezení, i zde vycházíme z technických parametrů stroje, které omezují minimální a maximální možný nastavitelný posuv.

a) Pro stroje s posuvy v mm na otáčku pak platí:

$$f \leq f_{s \max} [1] \quad (7.17)$$

kde:  $f_{s \max}$  – je maximální posuv dosažitelný na stroji v mm/ot

$$f \geq f_{s \min} [1] \quad (7.18)$$

kde:  $f_{s \min}$  – je minimální posuv dosažitelný na stroji v mm/ot

b) Pro stroje s posuvy v mm za minutu platí:

$$fn \leq f_{sm \max}, (fn = f_m) [1] \quad (7.19)$$

kde:  $f_m$  – je posuv v mm/min

$f_{sm \max}$  – je maximální posuv dosažitelný na stroji v mm/min,

$$fn \geq f_{sm \min} [1] \quad (7.20)$$

kde:  $f_{sm \min}$  – je minimální posuv dosažitelný na stroji v mm/min.

## 7.8 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem [1, 4, 7, 9, 10, 11]

Jedná se o odlišné omezení oproti výše zmíněným, a to díky tomu, že se nejedná o nerovnici nýbrž o rovnici (obsahující trvanlivost nástroje). Díky tomu má výjimečné postavení mezi ostatními omezujícími podmínkami.

Obrobitelnost materiálu lze charakterizovat určitým funkčním vztahem mezi proměnnými řezného procesu, stejně tak i řezivost nástroje a řezné prostředí. Obrobitelnost materiálu, řezivost nástroje, působení řezného prostředí – všechny tyto parametry spolu úzce souvisí. Popsat tyto vzájemné vazby pomocí základních veličin se zatím nepodařilo, a proto se využívá komplexního Taylorova vztahu.

Komplexní Tylorův vztah pro frézování je ve tvaru:

$$v_c = \frac{c_v * D_n^{w_v}}{a_p^{x_v} * f_z^{y_v} * B^{u_v} * Z^{q_v} * T^{\frac{1}{m}}} [1] \quad (7.21)$$

kde:  $c_v$  – empirická konstanta

$w_v$  – empirická konstanta

$x_v$  – empirická konstanta

$y_v$  – empirická konstanta

$u_v$  – empirická konstanta

$q_v$  – empirická konstanta

$m$  – empirická konstanta

$$n * f_z = \frac{10^3 * c_v * D_n^{w_v-1}}{\pi * B^{u_v} * Z^{q_v} * T^{\frac{1}{m}}} [1] \quad (7.22)$$

Tuto omezující podmínku lze začlenit do komplexu omezujících podmínek nebo do kritéria optimálnosti, dosazením za trvanlivost z komplexního Taylorova vztahu.

## 7.9 Organizační omezení [1]

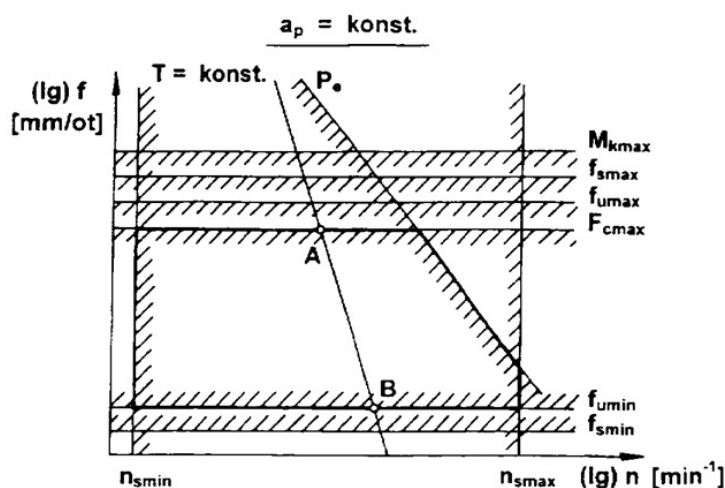
Kromě výše uvedených omezení technického charakteru můžou v praxi nastat i omezení organizační povahy. Může jít např. o omezení z hlediska množství unikátních nástrojů, časové rozmezí, kdy seřizovač vyměňuje nástroje apod.

## 8. Oblast přípustných řešení [1, 3, 4]

Kombinací předchozích omezujících kritérií vznikne určitá společná oblast neboli oblast přípustných řešení, kde některé omezující podmínky jsou lineární, resp. mocninového typu. Optimalizační algoritmy přitom vycházejí z určité hloubky řezu, a proto zobrazení tohoto diagramu přípustných řešení v souřadném systému např.  $(\log) f - (\log) n$  nebo  $(\log) f - (\log) v_c$  o něm zajistí dobrou představu.

Na obrázku č. 3 je ukázka možné oblasti přípustných řešení u stroje s posuvy v mm na otáčku, kde silně orámovaná část je oblast přípustných řešení (kombinací  $n$ - $f$ ) bez uvažování omezení z hlediska komplexního Taylorova vztahu.

Pokud budeme vycházet z konstantní trvanlivosti břitu nástroje (mělo by jít o trvanlivost optimální), pak se komplexní Taylorův vztah zobrazí v diagramu jako přímka. Potom oblast přípustných řešení je úsečka, na obrázku č. 3 označena jako A-B.



Obr. 3 Příklad oblasti přípustných řešení dle omezujících kritérií. [1]

## 9. Vztah optimální trvanlivosti a omezujících podmínek [1, 2, 3, 4]

Obecně nelze oddělit od sebe určení optimální trvanlivosti břitu nástroje a řezných podmínek, neboť spolu úzce souvisí. Oddělení je možné pouze za určitých okolností. Proto je vhodné využití komplexního optimalizačního výpočtu vedoucího k jednoznačně optimálním řezným podmínkám a optimální trvanlivosti nástroje.

V praxi se stanovuje optimální trvanlivost samostatně před výpočtem optimálních řezných podmínek. Je třeba zmínit, že takový přístup ovšem vždy nemusí vést k optimálním řezným podmínkám. Stanovení trvanlivosti před výpočtem řezných podmínek se děje z důvodu zjednodušení výpočtu, a z neznalosti vztahu ekonomiky obrábění, trvanlivosti nástroje a řezných podmínek.

Postup při tomto zjednodušení může být následující. Vycházíme nejprve ze zjištěné optimální trvanlivosti břitu nástroje bez respektování omezujících podmínek dle vybraného kritéria (viz. další kapitola), po té se aplikuje následující technologická zásada pro stanovení řezných podmínek postupným způsobem:

1. Určení optimální hloubky řezu. Mohou nastat dva případy:
  - a) obrábění na čisto – pak je velikost hloubky řezu rovna celému přídávku,
  - b) hrubování – při něm kvalifikovaně rozhodneme, zda budeme obrábět celý přídavek najednou (pokud jsou dostatečné rezervy ve výkonu, otáčkách nebo dalších výše uvedených omezujících podmínkách), nebo zda nebude nutné uvažovat paralelní stanovení optimálních řezných podmínek pro hloubky řezu nejprve rovnému celému přídávku, po té jeho polovině, pak třetině apod. Při tomto postupu se rozhodne o optimální variantě až na závěr, z vyčísleného kritéria optimálnosti.
2. Určení optimální velikosti posuvu. Pro zvolenou hloubku řezu se stanoví maximální přípustné velikosti posuvů, a to z omezujících podmínek, které nejsou funkcí otáček. Z těchto získaných hodnot se vybere minimální hodnota, která je optimálním posuvem.
3. Pro určené hodnoty trvanlivosti nástroje, hloubky řezu, posuvu, eventuálně další parametry jako např. šířku frézované plochy, se stanoví řezné rychlosti z komplexního Taylorova vztahu, resp. normativů řezných podmínek (které jsou tabelárním vyjádřením Taylorova vztahu).

4. Pokud bylo uvažování více paralelních výpočtů pro několik hrubovacích třísek, vybere se optimální varianta z vyčísleného kritéria optimálnosti.

5. V případě, že bylo využito stanovování řezných podmínek pomocí normativů, pak se v závěru provede kontrola překročení výkonu obráběcího stroje a maximálních otáček. Pokud došlo k překročení, úměrně výkonu stroje, resp. maximálním otáčkám stroje se sníží řezná rychlost. Potom tedy dochází k odklonu od optimální trvanlivosti dříve stanovené, resp. odklon od optima řezných podmínek a výrobních nákladů.

Tento postup plyne ze závislosti teploty řezání na řezných podmínkách:

$$\theta = k_{\theta} * a_p^{x_{\theta}} * f^{y_{\theta}} * v_c^{z_{\theta}}, (x_{\theta} < y_{\theta} < z_{\theta}) [1] \quad (9.1)$$

kde:  $\theta$  – je teplota řezání ve stupních,

$k_{\theta}, x_{\theta}, y_{\theta}, z_{\theta}$  – empirické konstanty.

Z předchozího vztahu, resp. z velikostí exponentů nezávisle proměnných vyplývá, že teplotu řezání a tím i opotřebení nástroje nejvíce ovlivňuje řezná rychlost, dále pak posuv a na konec hloubka řezu.

Z toho vyplývá, že stanovování řezných podmínek probíhá v opačném pořadí svého vlivu na teplotu řezání.

Tato zásada ovšem ztratí svou platnost při uplatnění některé z následujících omezujících podmínek z hlediska:

- výkonu obráběcího stroje,
- maximálních otáček dosažitelných na stroji,
- maximálního minutového posuvu dosažitelného na stroji,
- obecně další omezující podmínky, které jsou funkcí otáček.

Z toho plyne, že není-li při optimalizaci řezných podmínek postupným způsobem určita rezerva v těchto omezujících podmínkách, je použití takového postupu problematické.

## 10. Optimální trvanlivost bez uvažování omezujících podmínek

Pro určení optimální trvanlivosti bez uvažování omezujících podmínek existuje několik metod:

### 10.1 Optimální trvanlivost z hlediska minimálních výrobních nákladů [1, 4, 5, 13, 16]

Při určení optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů se vychází z nákladové funkce (3.18). Ta se vyjádří jako funkce trvanlivosti dosazením za otáčky z (7.4) a dále spočtením první derivace této funkce dle trvanlivosti. Z první derivace nákladové funkce dle trvanlivosti vyplyne, že optimální trvanlivost není funkcí posuvu a hloubky řezu. Dále se derivace položí rovna nule a vyjádří se trvanlivost. Platí tedy:

$$\frac{dN}{dT} = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot a_p^{x_v} \cdot k_r}{10^3 \cdot c_v \cdot f_z^{1-y_v} \cdot m} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} \cdot N_{sm} + \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot a_p^{x_v} \cdot k_r}{10^3 \cdot c_v \cdot f_z^{1-y_v} \cdot m} \cdot \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot T^{\frac{1}{m}-2} \cdot (t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}) = 0 \quad [1,2] \quad (10.1)$$

$$T_{optN} = \frac{t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \quad [1] \quad (10.2)$$

### 10.2 Optimální trvanlivost z hlediska maximální produktivity nákladů [1, 4, 5, 13, 16]

Určení vztahu pro optimální trvanlivost z hlediska maximální produktivity je analogické jako u výpočtu optimální trvanlivost z hlediska minimálních výrobních nákladů, jen se zde vychází z rovnice (3.2). Po úpravách platí:

$$T_{optN} = t_{vn} \cdot k_r \cdot (m - 1) \quad [1] \quad (10.3)$$

### 10.3 Optimální trvanlivost z hlediska maximálního zisku [1, 4, 5, 13, 16]

Vztahy pro trvanlivost z hlediska maximálního zisku je stejné jako s kritériem optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů. Potom tedy můžeme napsat:

$$T_{optZ} = T_{optN} [1] \quad (10.4)$$

### 10.4. Optimální trvanlivost s uvažováním omezujících podmínek [1, 4, 5, 13, 16]

Z předchozích vztahů plyne, že mnohé omezující podmínky nemají vliv na optimální trvanlivost břitu. Jedná se obecně o omezující podmínky, které nejsou funkcí otáček.

Jak již bylo uvedeno, jiné omezující podmínky jako např. omezení z hlediska výkonu stroje, maximální dosažitelné otáčky na stroji nebo maximální dosažitelný posuv na stroji způsobují, že optimální trvanlivost je nutné určovat ve vzájemné vazbě s optimálními řeznými podmínkami.

Metoda řešení vázaného extrému pro jednotlivé omezující podmínky (např. pomocí Lagrangeových multiplikátorů) je nevýhodná, a to z důvodu své složitosti neboť v praxi se obvykle uplatňuje více omezujících podmínek současně.

Výhodnějším řešením je použití komplexního optimalizačního výpočtu, který určí optimální hodnoty trvanlivosti a řezných podmínek ve vzájemné vazbě.

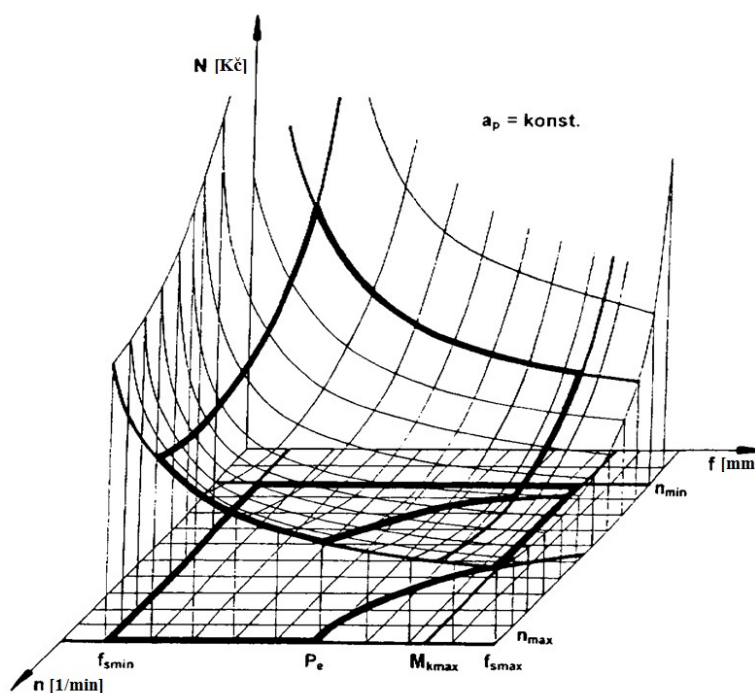


## 11. Komplexní optimalizace řezných podmínek [1, 4, 5, 11, 14, 16]

Komplexní optimalizace má tu výhodu, že vždy vede na optimální řešení. Nevýhodou je ovšem složitost jak přípravy, tak samotného provedení výpočtu. Při ručním zpracování by se jednalo v praxi o výrazně složitý postup, ovšem s rozvojem výpočetní techniky se tato metoda stává více dostupnější a realizovatelnější.

Ovšem přesto neexistuje obecný optimalizační software. Důvodem je hlavně nedostupnost informací, nutných k určení omezujících podmínek, složitost a určitá nákladnost jejich zjišťování (hlavně empirické koeficienty u řezných nástrojů), dále také způsob vyčíslení jednotlivých nákladů závisí na daném podniku. K tomu dodejme, že řada vstupů je časově a charakterem výroby závislá.

Při komplexní optimalizaci se vychází z určitého souboru omezujících podmínek a daného kritéria optimálnosti, kde jde o nalezení extrému účelové funkce nad oblastí přípustných řešení. Jak takový případ může vypadat v praxi je uvedeno na obrázku č. 4.



Obr. 4 Příklad tvaru nákladové funkce nad oblastí přípustných řešení při komplexní optimalizaci. [1]

Výpočet komplexním optimalizačním způsobem respektuje všechny vazby mezi omezujícími podmínkami a zvoleným kritériem optimálnosti. Podobně jako u postupného

způsobu optimalizace i zde je výhodné vycházet z určité hloubky řezu resp. z paralelních výpočtů pro různé počty třísek u hrubování.

Metody komplexní optimalizace mohou být následující:

### **11.1 Lineární programování a lineární parametrické programování [1, 3, 4]**

Vychází se zde z lineárních a linearizovatelných omezujících podmínek a kritéria optimálnosti. Používalo se hlavně v minulosti, kdy omezující podmínky byly všechny tohoto typu. Optimalizovat takto bylo možné pouze dle kritéria maximálního úběru.

Vzhledem k tomu, že omezujících podmínek v nelinearizovatelné podobě přibývá, je dnes tato metoda použitelná jen dost omezeně.

### **11.2 Analytické metody [1, 4]**

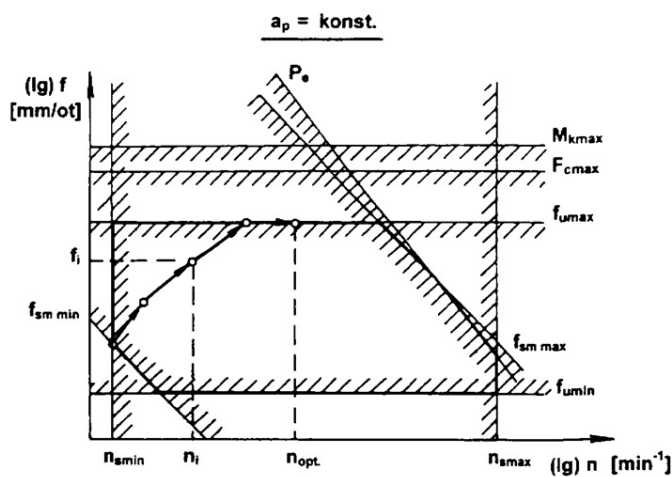
Při nich se vychází z předem prokázaných skutečností, mezi které patří důkaz, že pro existující omezující podmínky neleží optimální řešení uvnitř oblasti přípustných řešení, ale na následujících hranicích omezujících podmínek:

- z hlediska výkonu obráběcího stroje,
- z hlediska maximálního minutového posuvu dosažitelného na stroji,
- z hlediska maximálně přípustného kroutícího momentu, daného upnutím dílu,
- z hlediska maximálně přípustného ohybového momentu, daného upnutím díly,
- z hlediska typu omezující podmínky (dle přechozích popsanych omezení) obecně zapsané ve tvaru  $f \leq konst.$

Pak pro spojitě omezující podmínky platí, že pokud bude nalezen lokální extrém, bude tento extrém i extrémem totálním. V odborné literatuře lze najít různé algoritmy, které optimalizaci pomocí těchto analytických metod řeší.

### 11.3 Gradientní metoda [1, 4]

Podstatou je vyhledání extrému účelové funkce pomocí gradientu, a to postupným pohybem z výchozího bodu účelové funkce až do dosažení optima. Řešení může být matematické i grafické. (za pomoci počítačové grafiky)



Obr. 5 Příklad gradientní metody. [1]

### 11.4 Další metody [1]

Mezi další možnou metodu lze zařadit použití univerzálních optimalizačních softwarů jako je např. modulový optimalizační produkt GAMS.

## 12. Adaptivní optimalizace [1, 4, 6, 7, 9, 10]

Adaptivní optimalizace se dnes používá převážně u číslicově řízených strojů. Principem je zde okamžité stanovení optimálních řezných podmínek vycházejících z okamžitého stavu obráběcího procesu, a to za pomoci stejných metod jako u konvenční optimalizace před samotným obráběním. Jiný je zde vstup veličin do matematických vzorců omezujících podmínek a to ze snímačů charakteristik právě probíhajícího procesu v podobě určitých regulačních – řídicích – veličin, jako je příkon elektromotoru stroje, řezná síla, krouticí moment na vřetení, aktuální teplota řezání, drsnost obrobené plochy, změna opotřebení apod. Díky těmto vstupům se sníží počet zadávaných parametrů a potřebných konstant před samotným procesem obrábění. Snímání těchto údajů tak zabezpečuje přiblížení výpočtu realitě obrábění.

### **13. Návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek**

Existence určitých optimalizačních softwarů v současnosti vychází hlavně z principu, kdy často dochází pouze k určení směrných – doporučených hodnot a nikoliv ke skutečné optimalizaci. Praktická část této práce navrhuje skutečný optimalizační software, i když jen s některými zjednodušenými vstupy.

#### **13.1 Možnosti variant podoby optimalizačního softwaru [5, 6, 7, 9, 10]**

Varianty, jak by takový optimalizační software mohl vypadat, jsou následující:

- a) V ideálním případě by mohlo jít o integrovaný modul v některém z CAM systémů. Výhodou by bylo přímé propojení výsledných, tedy optimalizovaných, hodnot se samotným obráběcím programem/postupem, na základě kterého postprocesor generuje NC kód. Dle dostupných informací na odborných přednáškách (tzv. „setkání uživatelů“ CAM systémů) zatím žádný výrobce tvorbu takového modulu do svého CAM systému nepotvrdil.
- b) Další variantou by byla tvorba softwaru v podobě zásuvného modulu („pluginu“ nebo také „uživatelské aplikace“) do existujících CAM řešení. To je z vývojářského hlediska náročná varianta, hlavně z důvodů rozdílnosti programovacích jazyků pro jednotlivé moduly jednotlivých CAM systému, rozdílnosti v principu integrace do nich a také samotná časová náročnost tvorby takovýchto modulů je velká. V budoucnu pak existuje riziko, že výrobce obdobný výpočetní software vytvoří a integruje do svého produktu sám. Lze tedy uvažovat jediné o zakázkové výrobě takového řešení na míru daného podniku, kde by byla splněna podmínka pokrytí nákladů na tvorbu z ceny takového softwaru.
- c) V případě vytvoření samostatného softwaru odpadají problémy s různou integrací a různými programovacími jazyky CAM systémů. Na druhou stranu se zde přidává nutnost používat kromě CAM programu i specializovaný optimalizační software, a následně mezi nimi přepisovat hodnoty. Přesto se jedná o nejméně problematický postup řešení, a proto byla tato varianta vybrána a realizována.

### 13.2 Porovnání s existujícím řešením

V minulosti již byla na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie snaha vytvořit optimalizační software, a to pro soustružení rotačních výrobků. Praktické provedení bylo realizováno v prostředí Microsoft Excel a mělo sloužit jako šablona pro další tvorbu modulu do plnohodnotného CAM systému.

Komplexnějším systémem je program OPTIMAL, vytvořený v rámci disertační práce na Fakultě strojní, Západočeské univerzity v Plzni. Ten se zaměřuje na optimalizaci frézovacích parametrů při výrobě forem zápustek, zejména hloubky a šířky řezu. Vychází jak z omezujících podmínek, tak z vlastní databáze experimentálních výsledků závislosti drsnosti a řezných sil včetně databáze ekonomicko-organizační. [3]

Mezi další „optimalizační“ software by se daly zařadit i programy výrobců řezných nástrojů (např. SECO), i když se většinou nejedná o optimalizační programy v pravém slova smyslu, ale o software určující doporučené hodnoty pomocí zjednodušených výpočtů.

Dále jsou realizovány další programy převážně experimentálního charakteru, kdy jsou snahy určit optimální řezné podmínky např. pomocí akustické emise, vizualizovanými řeznými odpory, vibrodiagnostikou či snahou transformovat všechny pospané kritéria optimalizace a řezné vztahy i na jiné materiály než je ocel, a to konkrétně na dřevo. [12, 13, 14, 15, 16, 17]

### 13.3 Volba programovacího jazyka

Při volbě programovacího jazyka bylo prováděno rozhodování dle několika kritérií:

- srozumitelnost – optimalizační software by měl být dostupný pro další rozpracování v rámci závěrečných prací na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, a z tohoto důvodu by měl být zvolený programovací jazyk co nejsrozumitelnější i běžným studentům bez znalostí vyšších principů objektového programování apod.,
- kompatibilita – přestože nejrozšířenějšími operačními systémy zůstávají systémy Microsoft Windows, je s ohledem na další vývoj automatizovaných obráběcích strojů a výrobních linek nutné myslet i na spustitelnost na jiných platformách, ať už

v podobě optimalizačního softwaru, nebo v upravené podobě jako software pro adaptivní optimalizaci, či pro automatickou volbu řezných podmínek u strojů v průmyslu 4.0,

- výkonnost – vzhledem k výpočetní náročnosti optimalizačních algoritmů je nutné zajistit, aby daný programovací jazyk byl dostatečně výkonný i pro zpracování náročných výpočtů a případně v něm šlo snadno provádět paralelní výpočty,
- rozšířenost – zvolený jazyk by měl mít velkou dostupnost výukových materiálů, řešených příkladů, ukázkových kódů apod. a to vše nejlépe v českém a anglickém jazyce,
- cenová dostupnost – ideální by mělo být dostupné vývojové prostředí pro daný jazyk zdarma, či za malý poplatek.

Na základě těchto kritérií byl vybrán programovací jazyk VB.NET. Jedná se o plně objektově orientovaný jazyk, jehož syntaxe je tzv. „strojová angličtina“ a splňuje tedy podmínku čitelnosti i pro lidi, kteří neovládají některý ze složitějších programovacích principů. Zároveň je třeba dodat, že tento jazyk je ekvivalentní s jazykem C# (jde jen o jinou syntaxi).

Tvůrce jazyků C# a VB.NET, společnost Microsoft, v roce 2014 uvolnil zdrojový kód jazyků .NET jako open source, a díky tomu umožnil spouštění programů v nich napsaných i na jiných platformách než je Microsoft Windows. To tedy může znamenat i nejrůznější řídicí systémy obráběcích strojů a automatických linek v Průmyslu 4.0.

V jazycích rodiny .NET jsou k dispozici i knihovny pro paralelní výpočty, díky čemuž je možné v budoucnu optimalizační algoritmy optimalizovat z pohledů kódu softwaru, a tím zrychlit celý výpočet.

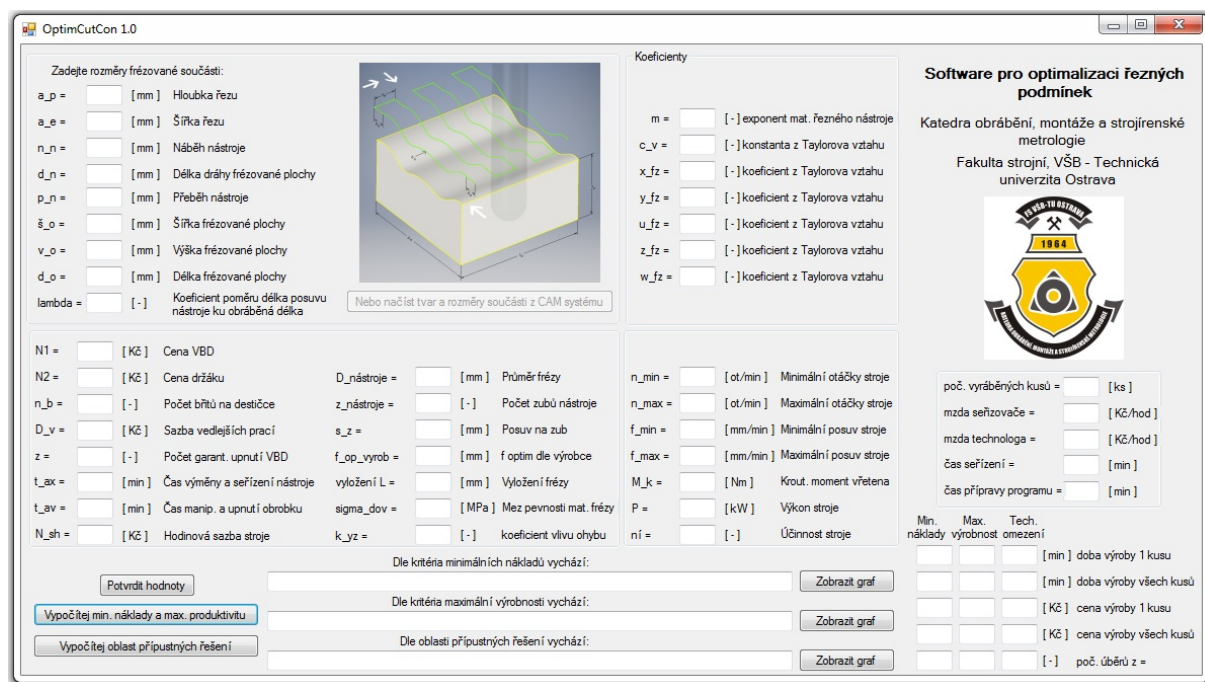
Popularita C# / VB.NET je velká, uvádí se, že patří mezi 10 nejžádanějších programovacích jazyků na celosvětovém pracovním trhu. To mimo jiné znamená i velkou dostupnost řešených příkladů, knížek apod., ze kterých je při dalším rozšiřování softwaru možno čerpat.

Závěrem je také třeba zmínit, že oficiální vývojové prostředí jazyků C#/VB.NET je Microsoft Visual Studio, jenž je ve verzi Express dostupné zdarma i pro komerční využití.

### 13.4 Prostředí vytvořeného softwaru

Na obrázku č. 6 je ukázán vytvořený software pro optimalizaci řezných podmínek při frézování tvarových ploch, nazvaný OptimCutCon.

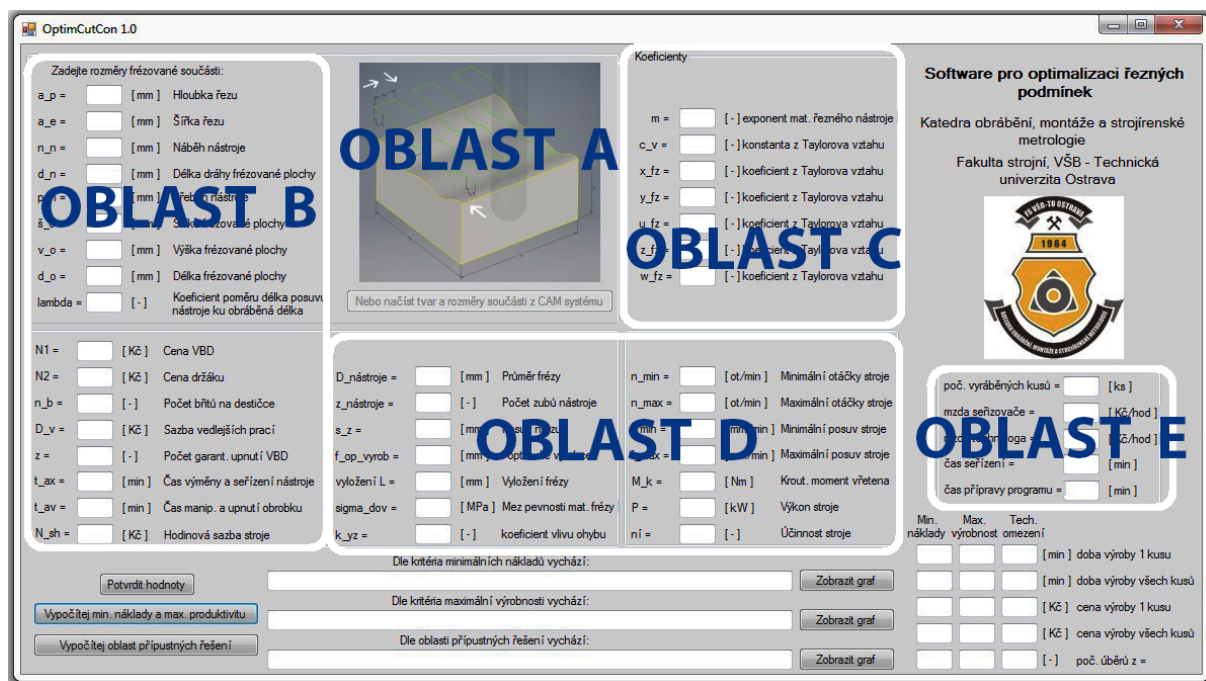
V programu jsou použity celkem tři kritéria, a to kritérium minimálních výrobních nákladů, maximální výrobnosti a pro oblast přípustných řešení dle technických omezení stroje. Výpočty v programu probíhají podle vzorců a postupů, uvedených v předchozích částech této práce.



Obr. 6 Prostřední optimalizačního softwaru OptimCutCon.

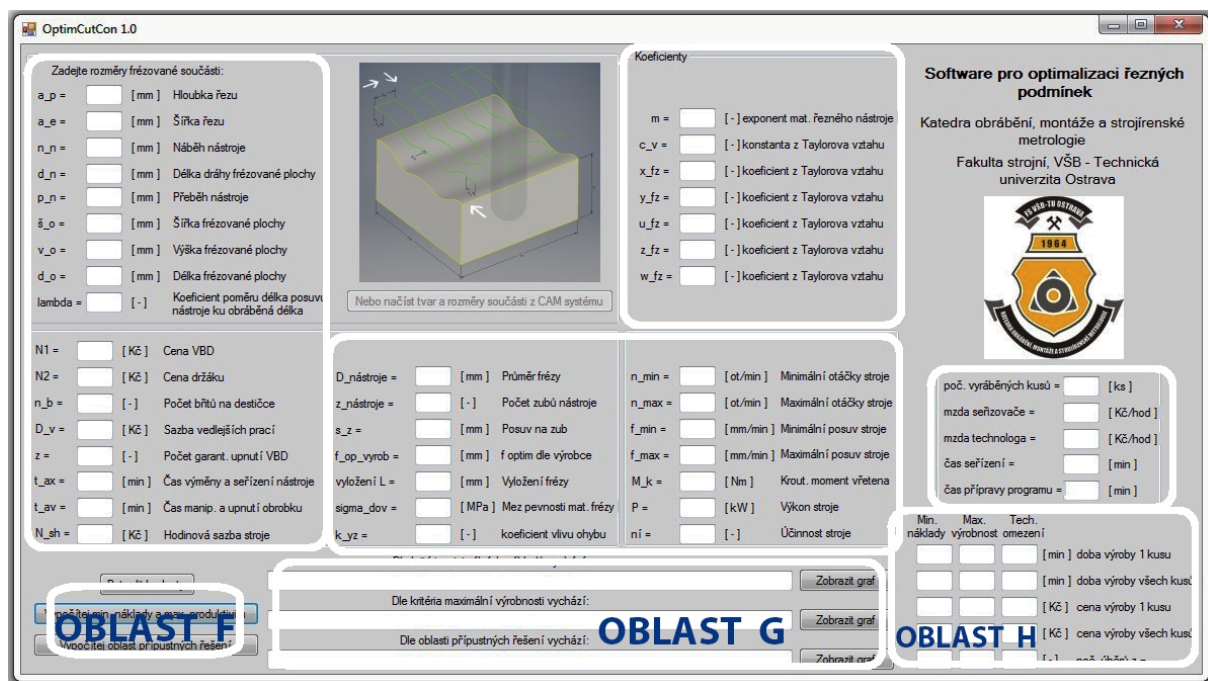
Pro názorné vysvětlení funkčnosti jednotlivých částí byly vytvořeny následující schémata, popisující jednotlivé části – oblasti vytvořeného softwaru.





Obr. 7 Oblasti A až E optimalizačního softwaru OptimCutCon.

Na obrázku č. 7 je popis oblastí, ve kterých se zadávají potřebné parametry. V oblasti A je schéma procesu frézování s okótovanými rozměry. Do budoucna je zde umístěno tlačítko pro načtení rozměrů polotovaru, resp. délek drah nástroje přímo z používaného CAM systému. V době psaní této práce však ještě toto řešení nebylo dokončeno z technických důvodů, a proto se s ním dá počítat až při dalším rozpracování a úpravách tohoto programu. V oblasti B se zadávají rozměry obráběné součásti dle příslušného schéma, náběh a výběh nástroje, a dále údaje o nástroji. Oblast C vyžaduje zadání empirických koeficientů z komplexního Taylorova vztahu. Zadávání pokračuje oblastí D, ve které se zadávají další údaje o parametrech stroje a nástroje. Oblast E slouží k zadání údajů potřebných pro vypočtení ceny a časů výroby jednotlivých a všech kusů v zadané dávce.

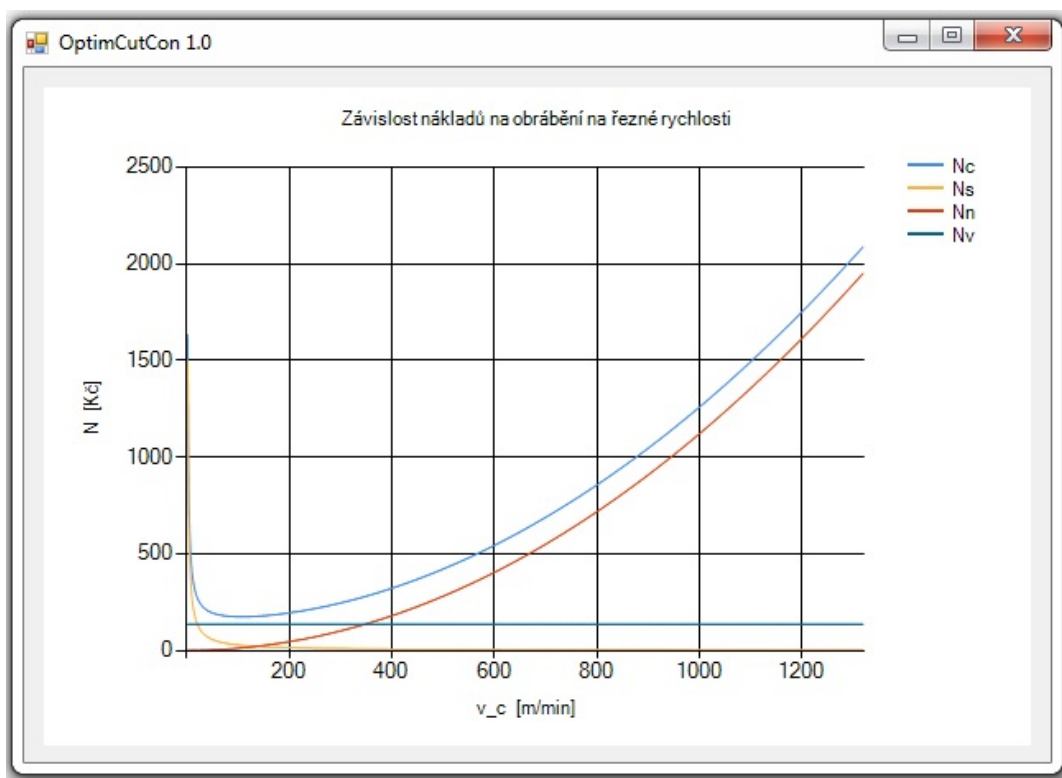


Obr. 8 Oblasti F až H optimalizačního softwaru OptimCutCon.

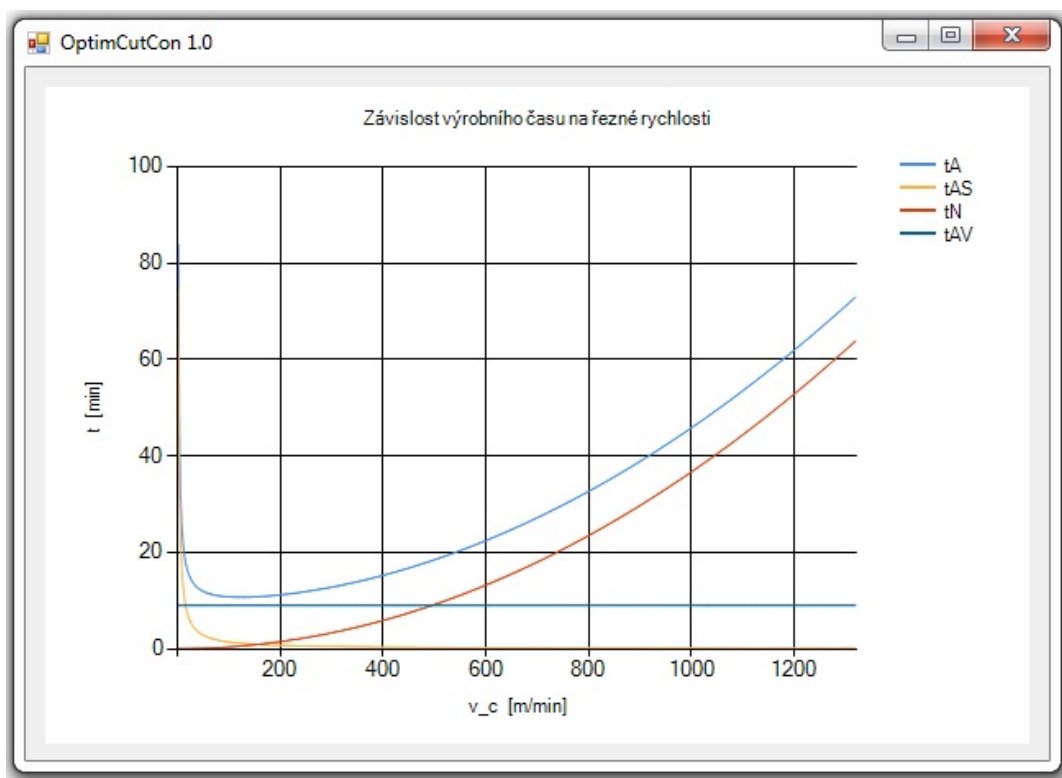
Na obrázku č. 8 jsou znázorněny poslední oblasti F, až H. Oblast F obsahuje tři tlačítka, kde první slouží k potvrzení všech zadaných parametrů (hodnoty tedy lze vyplňovat v jakémkoliv pořadí), další pak k výpočtu optimalizovaných parametrů dle kritérií minimálních výrobních nákladů a maximální produktivity, a konečně třetí zajišťuje výpočet oblasti přípustných řešení.

V oblasti G jsou zobrazeny vypočtené hodnoty pro všechny tři kritéria. Při dalším rozpracování programu lze uvažovat, že tento výstup zde bude nejen zobrazen, ale i přímo dosazen do obráběcího programu v příslušném CAM systému, se kterým bude program spolupracovat. Vedle každého z výsledků je i tlačítko pro zobrazení grafu, příslušného pro daný výsledek a kritérium. Ukázka těchto grafů je na obrázcích č. 9 až 11.

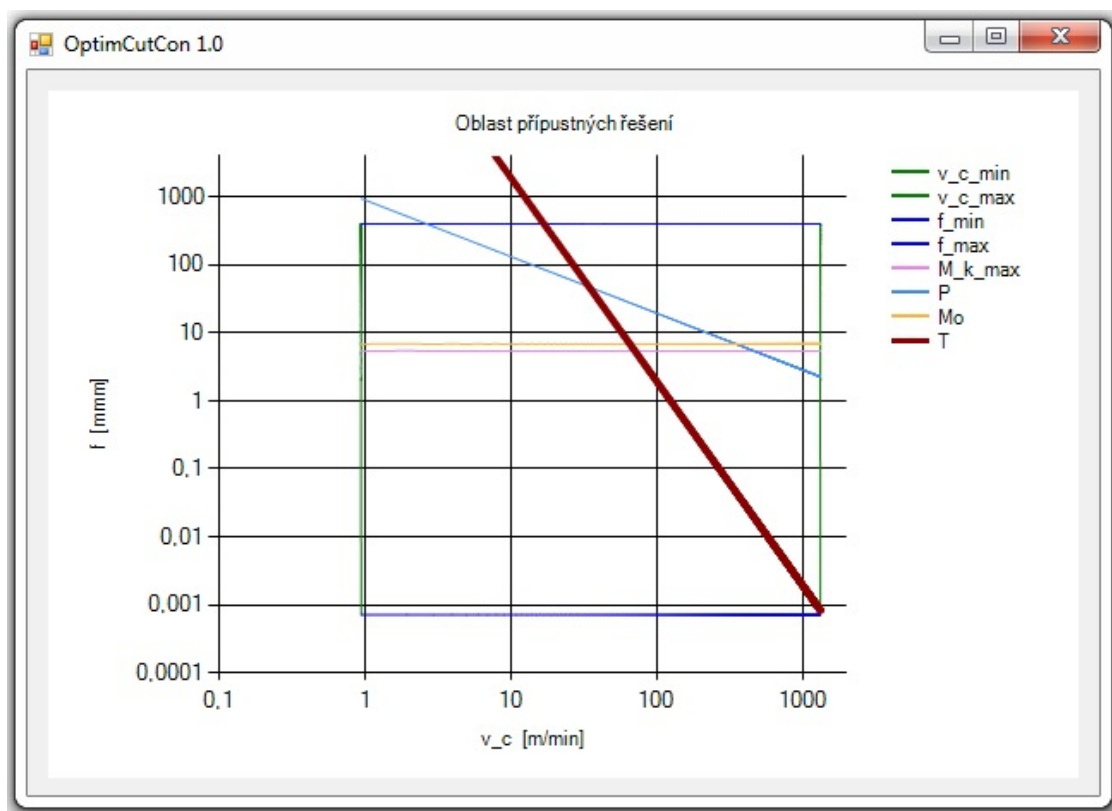
Poslední oblast H uvádí výsledný teoretický čas výroby jednoho a všech kusů, a cenu jednoho a všech kusů vycházejících ze zadaných ekonomických parametrů dle všech třech kritérií.



Obr. 9 Získaný graf závislosti nákladů na obrábění na řezné rychlosti v softwaru OptimCutCon.



Obr. 10 Získaný graf závislosti výrobního času na řezné rychlosti v softwaru OptimCutCon.



Obr. 11 Získaná oblast přípustných řešení a znázornění optimální trvanlivosti pro ni v softwaru OptimCutCon.

Příklad číselných výsledků dle jednotlivých kritérií jsou ukázány na obrázku č. 12.

Potvrdit hodnoty		Dle kritéria minimálních nákladů vychází:		Otáčky: 1140 [1/min] Řezná rychlost: 107,44 [m/min] Trvanlivost: 12,22 [min] Min. náklady: 174,22 [Kč]		Zobrazit graf
Vypočítej min. náklady a max.		Dle kritéria maximální výrobnosti vychází:		Otáčky: 1320 [1/min] Řezná rychlost: 124,41 [m/min] Trvanlivost: 7,85 [min] Čas minimální: 10,7 [sec]		Zobrazit graf
Vypočítej oblast přípustných řešení		Dle oblasti přípustných řešení vychází:		Otáčky: 1007 [1/min] Řezná rychlost: 94,91 [m/min] Trvanlivost: 15,37 [min] Posuv: 2,24 [mm] Posuv na zub: 13,44 [mm]		Zobrazit graf

Obr. 12 Jednotlivé číselné výsledky v oblasti G dle jednotlivých kritérií v softwaru OptimCutCon.

## 14. Závěr

Cíl této práce – návrh softwaru pro optimalizaci řezných podmínek při frézování tvarových ploch, byl splněn. Byl vytvořen optimalizační software v plnohodnotném programovacím jazyce, jenž je samostatně spustitelný a nezávislý na použitém CAM softwaru. V budoucnu se dá uvažovat o upravení takového programu pro konkrétní podnik, jenž by jej využíval. Úprava je nutná jednak z toho důvodu, že každý podnik vyjadřuje ekonomické vstupní parametry jinak, ale také protože jako vstupní veličiny figurují empirické koeficienty, jenž se získávají relativně obtížným způsobem. Při úpravě tohoto optimalizačního softwaru lze uvažovat i určení těchto koeficientů pro dané nástroje daného podniku.

V současné době probíhá testování daného softwaru na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie Fakulty strojní, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Současně s tím je tvořena i databáze empirických koeficientů, a lze dále uvažovat o jejím integrování přímo do programu. To by mimo jiné znamenalo i úsporu při praktickém používání softwaru, neboť experimentální měření a následné výpočty empirických koeficientů jsou časově a finančně náročné.

Může se naskýtat otázka, zdali nejsou úspory při volbě řezných podmínek malé, a přidáme-li k tomu náklady na úpravu programu na míru daného podniku, plus zjišťování empirických koeficientů nástrojů, tak můžeme nabýt dojmu, že se takováto optimalizace nevyplatí. V praxi se ovšem ukázalo, že s trendem zvyšujících se cen obráběcích strojů, rostoucí ceny elektrické energie, růstu nákladů na mzdy, sociální a zdravotní pojištění se postupně zvyšuje hodinová sazba stroje a časové náklady na výrobu, což je v kontrastu se zvětšující se konkurencí podniků na celosvětovém trhu a snaze vyrábět stále levněji. Největších úspor pak logicky můžeme dosáhnout u výroby rozměrných součástí, nebo u součástí z drahých materiálů. Konkrétním příkladem v [3] pak může být optimalizace frézování forem a zápuštěk, kdy došlo k snížení výrobní ceny jednoho kusu o více než pětinásobek a to při čtyřnásobném snížení výrobního času oproti řezným parametrům doporučeným výrobcem.

Ekvivalentně lze uvažovat, že náklady na proces optimalizace se do budoucna z různých důvodů sníží, např. zveřejňováním empirických koeficientů přímo výrobcí řezných nástrojů, či modifikací celého optimalizačního procesu vývojem nových metod v podobě zjišťování optimálních parametrů pomocí vibrodiagnostiky nebo akustické emise.

Mezi další využití vytvořeného programu mohou být výukové účely, protože na jednotlivých získaných grafech z programu lze snadno demonstrovat vliv změny jednotlivých parametrů obrábění, které je možné okamžitě měnit a současně sledovat výslednou změnu jednotlivých nákladů, časů a možných oblastí přípustných řešení.

V delším horizontu by se také dalo uvažovat o využití vytvořeného programu jako základ softwaru pro automatickou volbu řezných podmínek v továrnách nové generace v tzv. Průmyslu 4.0. Tam by měli být využívány převážně zcela automatické (nejen) obráběcí stroje. Lidská síla by se měla přesunout do oblasti programování, nastavování a údržby těchto strojů a linek, přičemž samotná výroba výrobků by měla být co nejvíce automatizovaná. V takovém případě pak použité algoritmy ve vytvořeném programu mohou sloužit pro automatickou volbu řezných podmínek, a to vše při maximální hospodárnosti výroby, kterou člověk – technolog obrábění, nikdy nemůže přesně stanovit pouze odhadem, jak se tomu děje většinou dnes.

## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání této práce.

*Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.*

## Použitá literatura

- [1] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1864-6.
- [2] KRAUS, Jan. *Optimalizace řezných podmínek u vybrané součásti*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [3] SKOPEČEK, Tomáš. *Příspěvek k optimalizaci obrábění forem a zápusťek z tepelně zpracovaných nástrojových ocelí*. Plzeň, 2005. Disertační práce. ZČU v Plzni.
- [4] MÁDL, Jan. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Vyd. 3. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1988.
- [5] MALEC, Petr. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [6] SADÍLEK, Marek. *Výzkum změny polohy osy nástroje při víceosém frézování: téze habilitační práce k habilitačnímu řízení v oboru Strojírenská technologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2672-1.
- [7] *Metal cutting: theories and models*. Sweden. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012. ISBN 978-916-3713-361.
- [8] PETRŮ, Jana. *Hodnocení vybraných parametrů integrity povrchu po obrábění vysokými rychlostmi: téze habilitační práce k habilitačnímu řízení v oboru Strojírenská technologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3815-1.
- [9] DE VOS, Patric a Jan-Eric STAHL. *Applied metal cutting physics*. Fagersta, Sweden: SECO TOOLS AB, 2016.
- [10] DE VOS, Patric a Jan-Eric STAHL. *Metal cutting: Theories in Practice*. 1. Lund - Fagersta, Sweden: SECO TOOLS AB, 2014.
- [11] ŠŤASTNÁ, Jana. *Sledování silových poměrů při vysokoposuvovém frézování*. Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [12] DOSTÁL, Jiří. *Využití akustické emise při hodnocení procesu obrábění*. Brno, 2017. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.



- [13] ČUPA, Jan. *Stanovení optimálních řezných podmínek na základě vizualizace řezných odporů*. Brno, 2017. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
- [14] MATYSKA, Milan. *Užití vibrodiagnostiky pro optimalizaci řezných podmínek při frézování*. Pardubice, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [15] MÁDL, Jan a Vilém SCHUBERT. *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1983.
- [16] CAHA, Tomáš. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] ŠEBELOVÁ, Eva. *Optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva*. Brno, 2014. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně.